

超流氦系统负压低温板翅式换热器 新型波纹-锯齿翅片的性能研究

郝鸿伟¹, 文键¹, 赵欣¹, 李超龙¹, 王斯民², 厉彦忠¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安)

摘要: 为提高超流氦系统负压低温板翅式换热器的流动及换热性能, 结合传统波纹翅片和锯齿翅片提出一种新型波纹-锯齿翅片, 并提出将锯齿密度作为一个新的结构参数对新型翅片进行描述。采用数值模拟的方法, 分别研究分析了波纹-锯齿翅片通道内流动换热物理场, 并与传统翅片进行了对比。结果表明: 相较于传统的波纹翅片和锯齿翅片, 波纹-锯齿翅片的传热因子 j 分别提升 19.97%~38.22% 和 25.09%~33.83%, 且在低雷诺数时性能提升更加明显; j 随波长、锯齿密度的增大而减小, 随双波高的增大而增大; 摩擦因子 f 随波长的增大而减小, 随双波高的增大而增大, 且随锯齿密度的增加呈先增大后减小的变化趋势。新型翅片提高了换热及综合性能, 该研究结果可为负压低温板翅式换热器的优化设计提供参考。

关键词: 超流氦系统; 负压低温换热器; 波纹-锯齿翅片; 翅片性能

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202111001 **文章编号:** 0253-987X(2021)11-0001-07



OSID 码

Study on the Performance of a New-Type Sine-Offset Fin for Negative Pressure Low Temperature Plate-fin Heat Exchanger in Superfluid Helium System

HAO Hongwei¹, WEN Jian¹, ZHAO Xin¹, LI Chaolong¹, WANG Simin², LI Yanzhong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to improve the flow and heat transfer performance of the negative pressure low temperature plate-fin heat exchanger in superfluid helium system, a new-type sine-offset fin was proposed by combining traditional offset fin and sine-wavy fin, and the offset density was proposed as a new structural parameter to describe the new sine-offset fin. The physical field of flow and heat transfer in sine-offset fin channel, the comparison of flow and heat transfer performance in three kinds of fin channels, and the influence of fin structural parameters on fin performance were studied and analyzed by numerical simulation. The results show that compared with traditional offset fin and sine-wavy fin, the heat-transfer factor j of the sine-offset fin was increased by 19.97%~38.22% and 25.09%~33.83%, respectively, and the improvement of the comprehensive performance is more obvious at lower Reynolds numbers; the j factor decreases with the increase of wavelength and offset density, and increases with the double waveheight. In addition, the friction factor f decreases with the wavelength and increases with the double waveheight, and increases first and then decreases with the increase of offset density. The new

收稿日期: 2021-03-25。 作者简介: 郝鸿伟(1999—),男,硕士生;文键(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51676146)。

网络出版时间: 2021-06-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210628.1028.004.html>

sine-offset fin structure can improve the heat transfer and comprehensive performance of plate-fin heat exchanger. This research may provide a reference for the optimal design of plate-fin heat exchanger.

Keywords: superfluid helium system; negative pressure low temperature heat exchanger; sine-offset fin; fin performance

一些大型科学装置需要超流氦低温系统来提供冷量,对超导腔或超导磁体进行冷却。负压低温换热器是超流氦低温系统的重要部件,其流动换热性能直接影响着系统的性能及可靠性^[1-2]。超流氦系统内的负压低温板翅式换热器,由于其工作特性,对流动换热综合性能要求很高。锯齿翅片主要通过翅片的交错来破坏流动传热边界层进而达到强化传热的目的,而波纹翅片则主要通过波纹结构,使流体在通道内的流动方向不断发生变化从而强化传热。许多学者对板翅式换热器翅片的表面性能进行相应的理论和实验研究^[3-9],但由于负压低温换热器特殊的工作环境,且低温下实验数据获取困难,目前其设计还主要依靠工程经验进行测试调整,没有成熟的设计方法和流程。在理论研究方面,王哲等针对超流氦系统的负压低温换热器,在考虑了低温下变物性和轴向导热的基础上开发了一种准一维换热器计算模型,并对一个实际工况进行了换热器的相关设计^[10]。李超龙等对锯齿翅片通道在负压低温工况下的性能进行了研究,并对其流动传热关联式进行拟合^[11];文献[12-14]均对负压低温换热器的换热及压降性能进行了相关研究。实验研究方面,Treite等将板翅式换热器应用于为费米实验室设计的1.8 K超流氦低温系统中^[15];Roussel等对欧洲粒子物理研究中心的250台负压低温换热器进行了室温及低温性能测试^[16-17];Kumar等通过对负压低温换热器进行优化将2 K超流氦的产率提高了7%^[18-19]。Han等构建了负压低温换热器的计算模型且对其结构参数进行了优化设计,并与实验结果进行了对比验证^[20]。

本文针对超流氦系统内负压低温换热器的具体工况,在波纹翅片和锯齿翅片的基础上进行改进,把波纹翅片每间隔一段长度切开并交错布置,形成锯齿翅片的效果,得到了新型波纹-锯齿翅片。通过对锯齿翅片、波纹翅片、新型波纹-锯齿翅片3种通道的性能进行对比,分析新型波纹-锯齿翅片特有的几何结构参数对其表面特性的影响规律,可为超流氦系统内负压低温板翅式换热器的性能优化提供理论基础。

1 几何模型及数值方法

1.1 新型波纹-锯齿翅片通道的结构特征

图1给出了一种波纹-锯齿翅片通道结构示意图。波纹-锯齿翅片包含两种翅片类型的常规结构参数,分别为翅片高度 h 、翅片间距 s 、翅片厚度 t 、波纹长度 w 、双波高 $2A$ 、翅片节距 l 。为了更好地描述波纹-锯齿翅片,定义了新的结构参数锯齿密度如下

$$m = \frac{l}{w} \quad (1)$$

锯齿密度指单个翅片节距内翅片的波纹周期数,将 l 与 w 结合在一起,可以更好地对波纹-锯齿翅片进行描述,图1所展示的波纹-锯齿翅片 $m=1$,即翅片节距与翅片波长相等。当锯齿密度为0.25的偶数倍时,翅片的交错位置处于波纹周期上振幅为0的位置;当锯齿密度为0.25的奇数倍时,翅片的交错位置处于波纹周期上波峰和波谷的位置。

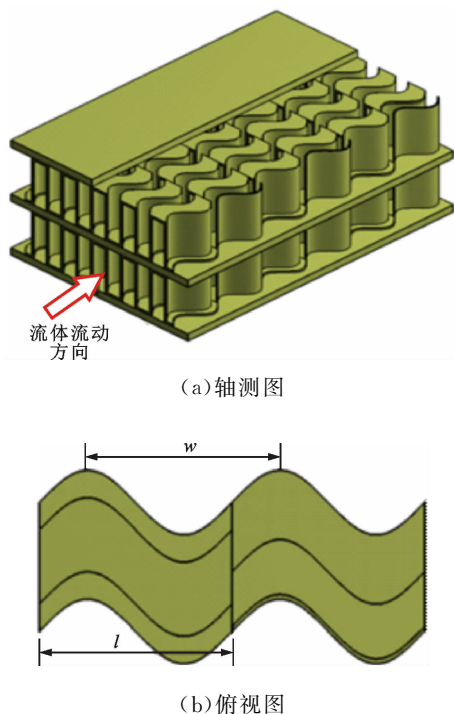


图1 波纹-锯齿翅片通道结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sine-offset fin channel structure

对于波纹-锯齿翅片,其当量直径定义如下

$$D_h = \frac{4A_c}{A} = \frac{4l(s-t)(h-t)}{2[l(s-t) + l_{\text{flow}}(h-t)] + t(s+2h-4t)} \quad (2)$$

式中 l_{flow} 为流体在翅片通道内的流动长度。

1.2 计算模型构建

图 2 为波纹-锯齿翅片通道的计算模型,翅片的结构参数为: $h=6.5 \text{ mm}$, $s=2 \text{ mm}$, $t=0.3 \text{ mm}$, $w=9 \text{ mm}$, $2A=2 \text{ mm}$, $m=1$,翅片通道由波纹-锯齿翅片、上下隔板、流体入口延长段及出口延长段组成。具体工况为:负压氦气的入口温度为 3 K,采用速度入口边界条件,压力出口边界条件,出口背压为 2 kPa,氦气流动的雷诺数在 1 000~5 000 之间;模型的左右两侧采用周期性边界条件;上下隔板外表面采用恒温边界条件,壁温为 4 K。流固接触位置采用耦合壁面。

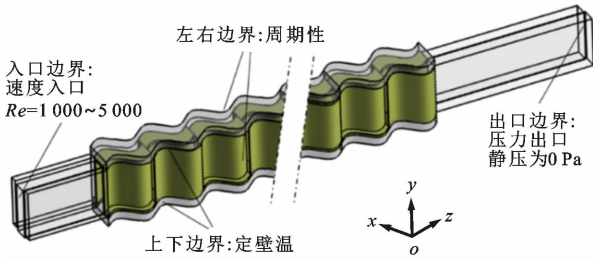


图 2 波纹-锯齿翅片计算模型

Fig. 2 Calculation model of sine-offset fin

通过 SIMPLE 算法进行求解,采用二阶迎风格式对动量和能量方程进行离散,负压低温氦气流动的 Re 范围是 1 000~5 000,属于湍流状态,采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行模拟计算。当各方程计算残差均小于 1×10^{-6} 时,认为计算收敛。求解中涉及的连续性方程、动量方程和能量方程,可参见文献[9]。

1.3 数据处理

通过数值模拟的方式,采用传热因子 j 和摩擦因子 f 对翅片通道的传热及流动性能进行评价分析,计算公式如下

$$j = \frac{Nu}{RePr^{1/3}} \quad (3)$$

$$f = \frac{\rho D_h \Delta p}{2G^2 L} \quad (4)$$

式中: Δp 为通道压力降; G 为质量流量; L 为翅片通道总长度。

采用综合性能因子 F_{TEF} 作为换热器综合性能的评价准则,计算公式为

$$F_{\text{TEF}} = \frac{j}{f^{1/3}} \quad (5)$$

1.4 网格划分及模型验证

采用六面体网格,并对流固体耦合界面处的网格进行加密,生成的网格示意图如图 3 所示。同时,对生成的网格进行了独立性验证,当网格数为 2 536 452 时, j 和 f 的变化幅度在 1% 以内。因此,采用该网格划分方式来对后续的翅片通道进行模拟。

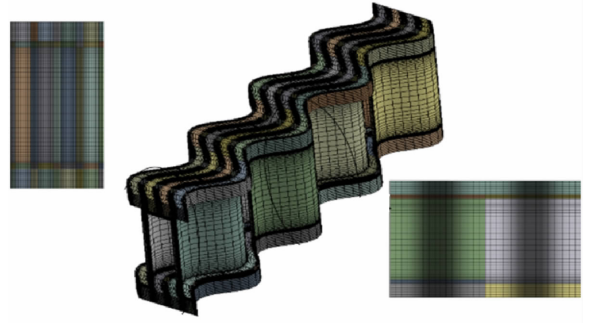


图 3 波纹-锯齿翅片局部网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of local grid generation of sine-offset fin

因为缺乏波纹-锯齿翅片的相关实验数据,为验证数值模型的有效性,本文通过 Kays 研究中的编号为 11.5-3/8W 的波纹翅片^[21]进行模型验证,结果如图 4 所示。在所研究的雷诺数范围内, j 及 f 的平均绝对偏差分别为 3.16% 和 4.37%,最大偏差分别为 4.94% 和 5.69%,数据吻合很好。因此,认为该计算模型可以准确地反映出波纹-锯齿翅片通道内的流动换热性能。

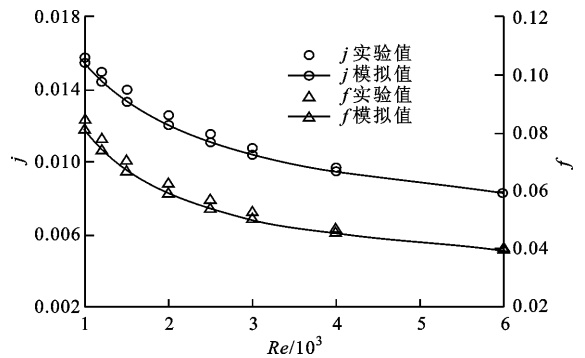


图 4 实验验证结果

Fig. 4 Experimental verification result

2 计算结果及分析

2.1 翅片通道内流动换热分析

图 5 是 Re 为 1 000、负压氦气入口温度为 3 K、上下隔板温度为 4 K、操作压力为 2 kPa 时波纹-锯齿翅片通道内的局部流线和温度分布云图,截面位

于 $y=h/2$ 处。由图可以看出,在翅片通道的中间部分,氢气的流动方向不断发生变化,同时在翅片的交错处,由于通道横截面积减小,氢气的流动速度明显增大,在翅片的正后方形成一个低流速尾流区。在波纹翅片内部,在波峰和波谷的内侧区域及外侧区域,分别形成了局部的低流速区域和高流速区域,同时在波峰和波谷的内侧区域形成了明显的涡旋区域。由于翅片交错的影响,波峰内侧的涡旋区域明显小于波谷位置的涡旋区域。氢气沿流动方向温度逐渐升高,温度场与速度场基本对应,在波峰波谷的内侧低速涡流区及翅片的正后方的低速尾流区,流体温度相对较高;在通道的中间区域,氢气流速较大,温度较低。

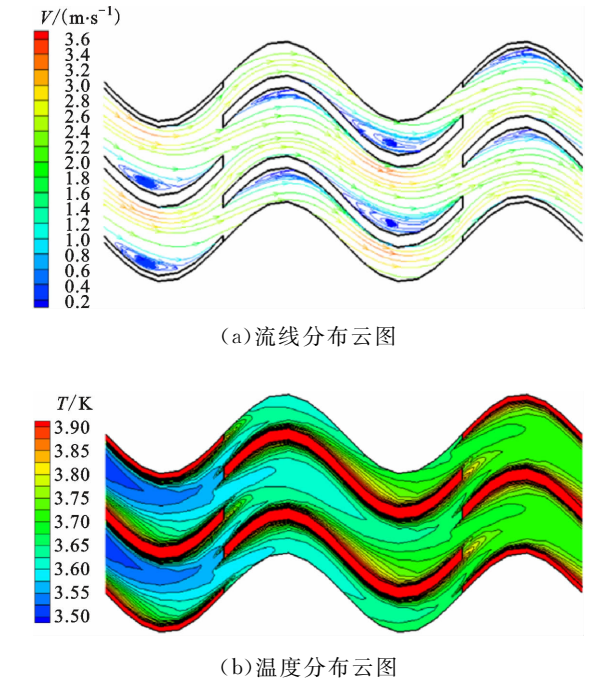


图 5 波纹-锯齿翅片通道物理场分布图

Fig.5 Physical field distributions in sine-offset fin channel

2.2 3 种翅片通道性能对比

为研究波纹-锯齿翅片通道与波纹翅片和锯齿翅片通道内流动换热性能的差异,分别对 3 种翅片通道类型进行模拟,其具体结构参数如表 1 所示,锯齿翅片通道及波纹翅片通道内的局部流线分布如图 6 所示。对于锯齿翅片通道,氢气的流动较为平稳,在翅片的交错处,氢气的流动速度明显增加;对于波纹翅片通道,在波峰和波谷的内侧区域,主流难以流经,形成了明显的涡旋区域,涡旋区域氢气的流速也相对较低。结合图 5 对比可以发现,波纹-锯齿翅片通道内速度分布的不均匀性更高,形成的涡旋区域也明显大于波纹翅片通道,说明波纹-锯齿翅片通道

内流体的扰动更强。

表 1 不同类型翅片的结构参数

翅片类型	h/mm	s/mm	t/mm	l/mm	w/mm	$2A/\text{mm}$	m
锯齿	6.5	2	0.3	6			
波纹	6.5	2	0.3		9	2	
波纹-锯齿	6.5	2	0.3	9	9	2	1

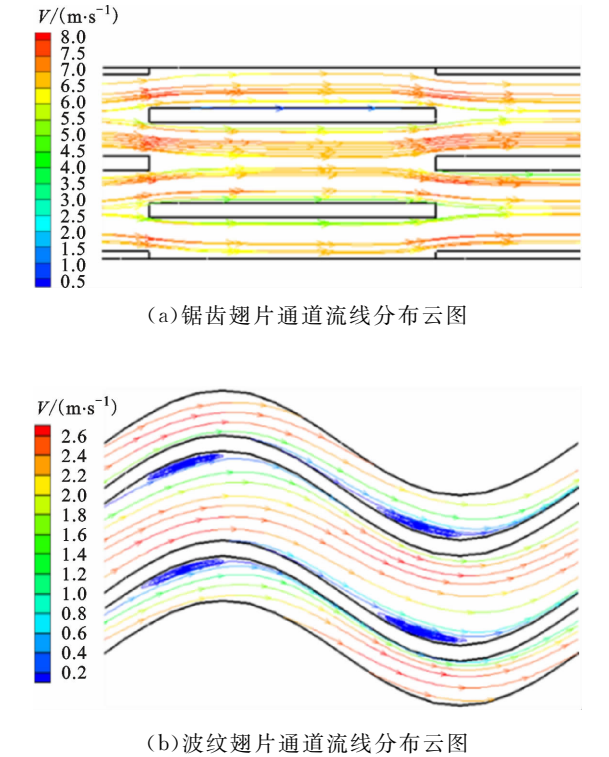
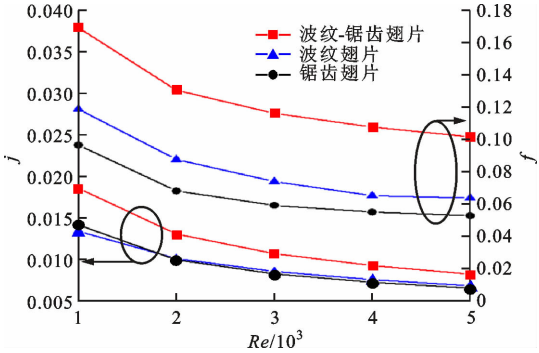


图 6 锯齿翅片及波纹翅片通道流线分布云图

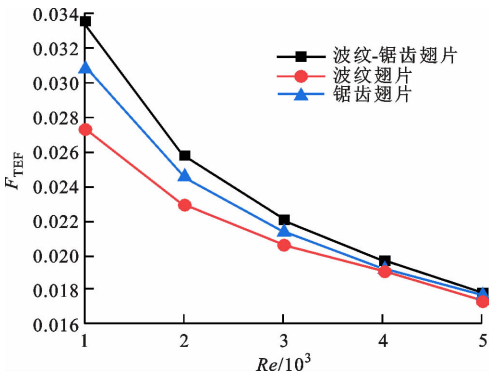
Fig.6 Streamline distributions in offset fin channel and sine-wavy fin channel

计算结果对比如图 7 所示。在所研究的 Re 范围内,波纹-锯齿翅片结构的 j 最大,相较于波纹翅片及锯齿翅片, j 分别提升 19.97%~38.22% 和 25.09%~33.83%,而 f 从小到大依次为锯齿翅片、波纹翅片和波纹-锯齿翅片。这是因为波纹-锯齿结构结合了两种翅片结构的强化传热机理,在翅片节距内通过二次流增强流体的搅混,在翅片交错处通过交错翅片对流动边界层进行破坏,进一步增强湍动。这使得波纹-锯齿翅片结构相较于单独的波纹结构和锯齿结构,传热性能增强十分显著,也导致了压降的增加。波纹-锯齿翅片结构的 F_{TEF} 高于锯齿翅片和波纹翅片,并且不同翅片结构之间的这种差异在 Re 越小时越明显,即在较低的 Re 时,波纹-锯齿翅片的综合性能提升较为明显。由此说明,

在实际负压低温板翅式换热器的设计中,当换热器运行在较低的 Re 工况下时,可以考虑以波纹-锯齿翅片替代锯齿翅片或者波纹翅片,从而提高换热器的综合性能。



(a) j 和 f 随 Re 的变化曲线



(b) F_{TEF} 随 Re 的变化曲线

图 7 不同翅片结构的 j 、 f 和 F_{TEF} 随 Re 的变化曲线
Fig. 7 Variation of factor j , factor f and factor F_{TEF} with Re for different fin structures

2.3 翅片参数对翅片性能的影响

对于波纹翅片及锯齿翅片,已存在大量关于翅高、翅距及翅厚对翅片表面性能影响的研究,因此本文主要对其波长、双波高及特有的结构参数锯齿密度对翅片性能的影响进行研究。

2.3.1 翅片波长对翅片性能的影响 在雷诺数为 1 000~5 000 的范围内,不同翅片波长对 j 和 f 的影响如图 8 所示, j 及 f 均随波长的减小而增大,波长越小,波纹结构越明显,翅片通道内二次流的形成和脱离更容易,对负压低温氦气流动的扰动更强,边界层破坏更彻底,且波长越小时, f 的变化率越大。波长每增大 3 mm, j 就降低 8.47%~17.03%。翅片波长从 6 mm 增大到 9 mm, f 降低 49.79%~60.20%;翅片波长从 9 mm 增大到 12 mm, f 降低 28.29%~35.35%。这说明减小翅片波长会大幅增加翅片通道的流动阻力损失,由于负压低温换热器

对压降要求很高,不适宜选用波长过短的波纹-锯齿翅片。

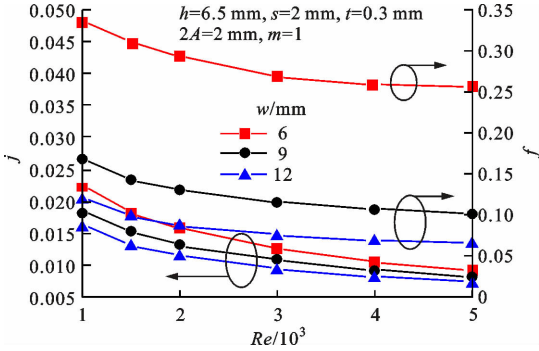


图 8 不同翅片波长时 j 和 f 随 Re 的变化曲线

Fig. 8 Variation of factor j and factor f with Re at different fin wavelengths

2.3.2 翅片双波高对翅片性能的影响 在雷诺数为 1 000~5 000 的范围内,不同翅片双波高对 j 和 f 的影响如图 9 所示,双波高越大, j 和 f 越大。双波高每增加 1 mm, j 增大 6.19%~12.24%, f 增大 41.20%~52.84%。这说明双波高越大,流体在波峰和波谷处的扰动越强,翅片强化传热的作用越明显,但同时负压低温氦气流动方向与翅片表面的夹角也会增大,冲击翅片表面所带来的摩擦阻力损失也就急剧增加。此外,随双波高的增大,通道内二次流的形成和脱离更容易,也会增大流体内部的摩擦阻力损失,使翅片的流动性能下降。由于负压低温换热器对压降要求很高,在实际负压低温板翅式换热器波纹翅片的设计过程中,需要根据运行工况优先选择双波高更小的波纹-锯齿翅片。

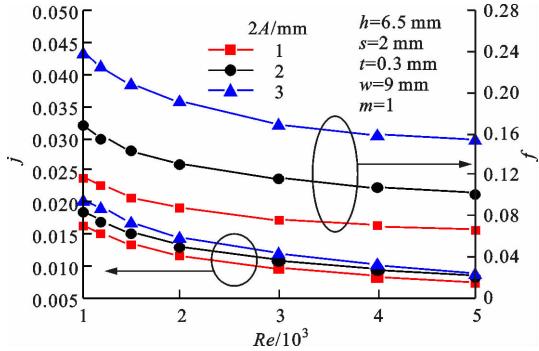


图 9 不同翅片双波高时 j 和 f 随 Re 的变化曲线

Fig. 9 Variation of factor j and factor f with Re at different fin double waveheights

2.3.3 锯齿密度对翅片性能的影响 在雷诺数为 1 000~5 000 的范围内,不同锯齿密度对 j 和 f 的影响如图 10 所示,随锯齿密度的增大, j 逐渐减小,且锯齿密度越小,这种变化越明显,锯齿密度每增加

0.25, j 降低 0.86%~6.30%, 锯齿密度越大, 相邻翅片交错处的间隔越长, 流动边界层不能及时被破坏, 因而传热性能下降。 f 随锯齿密度的增加先增大后减小, 当锯齿密度为 0.75 时 f 最大。一方面是由于锯齿密度越小, 氦气在翅片交错处的局部阻力损失更为频繁; 另一方面对于锯齿密度为 0.75 和 1.25 的翅片, 其翅片交错处是通道内二次流的形成位置, 翅片的交错破坏了这种稳定的二次流, 降低了二次流所导致的通道内流动性能的衰减。因而, 锯齿密度为 0.5 的翅片综合性能优于锯齿密度为 0.75 的翅片, 锯齿密度为 1 的翅片综合性能也优于锯齿密度为 1.25 的翅片。对于锯齿密度为 0.5、1、1.5 的 3 种交错位置处于波纹振幅为 0 位置的波纹-锯齿翅片, 应优先选择锯齿密度较低的翅片。在实际负压低温板翅式换热器波纹翅片的设计过程中, 需要区分翅片的交错位置不同的波纹-锯齿翅片。

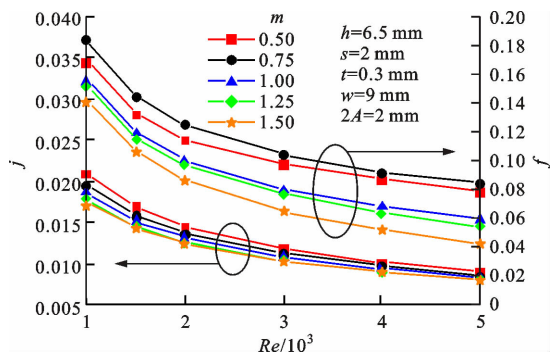


图 10 不同锯齿密度时 j 和 f 随 Re 的变化曲线

Fig. 10 Variation of factor j and factor f with Re at different fin offset densities

3 结 论

本文结合波纹翅片和锯齿翅片的结构特点加以改进, 提出一种新型的波纹-锯齿翅片结构, 对负压低温氦气在波纹-锯齿翅片通道内的流动换热性能进行研究, 对比了波纹翅片、锯齿翅片和波纹-锯齿翅片的流动换热性能, 研究了翅片结构参数对翅片性能的影响, 得出如下结论。

(1) 波纹-锯齿翅片通道内流场分布兼具锯齿翅片通道和波纹翅片通道内流场分布的特征, 既在翅片的正后方形成一个低流速尾流区, 又在波峰和波谷的内侧区域形成了局部的低流速涡旋区域, 通道内温度场与速度场基本对应, 流速大的位置区域温度较低, 流速小的位置区域温度较高。

(2) 相较于单独的波纹结构和锯齿结构, 波纹-锯齿翅片的传热性能更好, 相较于波纹翅片和锯齿

翅片, j 分别提升 19.97%~38.22% 和 25.09%~33.83%。虽然波纹-锯齿翅片的阻力最大, 但流动换热综合性能比单一的波纹和锯齿翅片好, 尤其在较低的 Re 时更明显。

(3) 波纹-锯齿翅片通道的各个结构参数对翅片性能的影响各有不同, 在研究范围内, 减小翅片波长、增加翅片双波高均可强化传热, 但也会增大流体内部的摩擦阻力损失; j 随锯齿密度的增加而减小, 锯齿密度每增加 0.25, j 降低 0.86%~6.30%; 随锯齿密度的增加, f 先增大后减小, 当锯齿密度为 0.75 时 f 最大。

参考文献:

- [1] 杨鹏程, 陆小飞, 张硕, 等. 超流氦低温系统及负压换热器的研究进展 [J]. 低温与超导, 2018, 46(10): 12-18.
YANG Pengcheng, LU Xiaofei, ZHANG Shuo, et al. Development of superfluid helium cryogenic system and sub-atmosphere heat exchanger [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2018, 46(10): 12-18.
- [2] 张朋. 大型氦低温系统关键技术及工作特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [3] RANGANAYAKULU C, LUO X, KABELAC S. The single-blow transient testing technique for offset and wavy fins of compact plate-fin heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111(1): 1588-1595.
- [4] DONG J, CHEN J, CHEN Z, et al. Air-side thermal hydraulic performance of offset strip fin aluminum heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2/3): 306-313.
- [5] KIM M S, LEE J, YOON S J, et al. Correlations and optimization of a heat exchanger with offset-strip fins [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(9/10): 2073-2079.
- [6] MANGLIK R M, ZHANG J, MULEY A. Low Reynolds number forced convection in three-dimensional wavy-plate-fin compact channels: fin density effects [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(8): 1439-1449.
- [7] RAMGADIA A G, SAHA A K. Numerical study of fully developed unsteady flow and heat transfer in asymmetric wavy channels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 102(1): 98-112.
- [8] YANG Huizhu, WEN Jian, WANG Simin, et al. Thermal design and optimization of plate-fin heat exchangers based global sensitivity analysis and NSGA-

- II [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136(1): 444-453.
- [9] 文键, 李科, 刘育策, 等. 利用流固耦合分析的板翅式换热器锯齿型翅片多目标优化 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(2): 130-135.
- WEN Jian, LI Ke, LIU Yuce, et al. Multiobjective optimization of serrated fin in plate-fin heat exchanger by fluid structure interaction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2): 130-135.
- [10] 王哲, 厉彦忠, 李正宇, 等. 液氮/超流氦制冷系统负压换热器仿真及优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(8): 143-150.
- WANG Zhe, LI Yanzhong, LI Zhengyu, et al. Simulation and optimization for sub-atmospheric heat exchanger of liquid helium/superfluid helium refrigeration system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(8): 143-150.
- [11] 李超龙, 许世峰, 文键, 等. 负压低温板翅式换热器锯齿翅片性能的数值模拟研究 [J]. 真空与低温, 2021, 27(2): 141-145.
- LI Chaolong, XU Shifeng, WEN Jian, et al. Numerical simulation of serrated fin performance of plate fin heat exchanger under negative pressure and low temperature condition [J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, 27(2): 141-145.
- [12] GUPTA PK, RABEHL R. Numerical modeling of a 2 K J-T heat exchanger used in Fermilab vertical test stand VTS-1 [J]. Cryogenics, 2014, 62(1): 31-36.
- [13] UENO Y, OKAMURA T, SATO A. Numerical study on characteristics of a pre-cooling He II heat exchanger [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 710(1): 1741-1751.
- [14] 钱婧. 百瓦量级超流氦制冷系统负压换热器的设计与优化分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [15] TREITE P, NUESSELEIN U, JIA Y, et al. Design, project execution, and commissioning of the 1.8 K superfluid helium refrigeration system for SRF cryomodule testing [J]. Physics Procedia, 2015, 67(1): 111-115.
- [16] ROUSSEL P, BE'ZAGUET A, BIERI H, et al. Performance tests of industrial prototype subcooling helium heat exchangers for the large hadron collider [C]// AIP Conference Proceedings. Melville, NY, USA: American Institute of Physics, 2002: 1429-1436.
- [17] GILBERT N, ROUSSEL P, RIDDONE G, et al. Performance assessment of 239 series helium sub-cooling heat exchangers for the large hadron collider [C]// AIP Conference Proceedings. Melville, NY, USA: American Institute of Physics, 2006: 523-530.
- [18] KUMAR A, NAKAI H, NAKANISHI K, et al. Design optimization of the 2 K heat exchanger for the superfluid helium cryogenic systems at KEK [J]. Cryogenics, 2020, 111: 103173.
- [19] KUMAR A, NAKAI H, NAKANISHI K, et al. Performance analysis for 2 K heat exchanger for superfluid cryogenic system at KEK [C]// IOP Conference Series Materials Science and Engineering. Bristol, England: IOP Publishing, 2019: 1201-1205.
- [20] HAN Ruixiong ZOU Zhengping, GE Rui, et al. Design optimization, construction and testing of 2 K Joule-Thomson heat exchanger for a superfluid helium cryogenic system [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115774.
- [21] KAYS W M, LONDON A L. Compact heat exchanger [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1964: 97-112.

(编辑 荆树蓉 亢列梅)